

# 고체로켓 추진기관용 연소관단열재의 내열성능평가를 위한 시험장치 개발

강윤구\*† · 윤덕진\*\* · 김수영\*\* · 이종성\*\* · 권태하\*\*\*

## A Development of Test Equipment for Thermal Protection Performance on Insulator used in Solid Rocket Motor

Yoongoo Kang\*† · Deokjin Yun\*\* · Suyoung Kim\*\* · Jongsung Lee\*\* · Taeha Kwon\*\*\*

### ABSTRACT

Test equipment was designed and manufactured to evaluate thermal reaction characteristic of internal insulators of solid rocket motor. Test is allowed up to chamber pressure 2,500 psi, burn-time 40 s. It is possible to observe and to compare thermal reaction characteristic for a few materials simultaneously, under the condition that the ablation occurs. In efficient average chamber pressure 878 psi, efficient burn-time 10.7 s and gas velocity 100 m/s, test was executed for confirming safety of equipment, being 4 test materials inserted simultaneously. Basic data for understanding thermal characteristic of internal insulator, that is, pressure-time curve, temperature-time curve in the test sample, and thermal destruction depth of test samples was gained successfully.

### 초 록

고체로켓 추진기관의 연소관 내부에 사용되는 연소관단열재의 열반응 특성을 평가하기 위한 모사시험장치를 개발하였다. 연소실 압력 2,500 psi, 연소시간 40 s까지 시험을 할 수 있으며, 삭마가 일어나는 조건에 대해 재료의 열반응 특성을 확인할 수 있고, 여러 시편을 동시에 상대 비교할 수 있다. 시험장치의 안전성을 확인하기 위하여 연소실 유효평균압력 878 psi, 유효연소시간 10.7 s, 연소가스속도 100 m/s 조건에서 각기 다른 시편 4 종을 동시에 장착하여 시험을 수행하였으며, 열반응 특성 분석에 필요한 기본 데이터들, 즉 연소실의 압력-시간 선도, 재료 내부에서의 온도-시간 선도, 재료의 열과괴두께를 획득하였다.

Key Words: Solid Rocket Motor(고체로켓추진기관), Internal Insulator(연소관단열재), Thermal Reaction(열반응), Thermal Destruction(열과괴)

\* 국방과학연구소

\*\* 한화테크윈

\*\*\* 한화

† 교신저자, E-mail: eagle@add.re.kr

고체로켓 추진기관의 연소실 내부는 추진제가 연소하면서 발생하는 3,000 K 이상의 고온 연소 생성물과 국소적으로 높은 연소가스 속도로 인해 열적 환경이 극심하다. 이러한 열환경에서 연소관 단열재는 연소관 구조체와 추진제 사이에 배치되어 추진제가 연소하면서 발생하는 고온 고압의 연소가스로부터 연소관 구조체를 보호해주는 역할을 한다. 연소관단열재의 적절한 두께 결정 및 소재 선택은 추진기관의 열적 안전성 뿐만 아니라 성능에 매우 중요하며, 이를 위해 열환경 조건 변화에 따른 연소관단열재의 열반응 특성을 이해하는 것이 요구된다.

재료의 열반응을 평가하기 위해 실험적 방법, 시험적 방법, 그리고 해석적 방법이 사용된다. 실험적 방법은 시험적 방법에 비해 상대적으로 비용이 적게 들고 운용이 용이한 장점이 있는 반면 실험적 방법은 실제 열환경을 가장 잘 모사할 수 있다는 장점이 있다. 해석적 방법은 최근 열반응에 대한 정보의 축적과 컴퓨터의 발달로 인해 적용빈도가 증가하고 있다.

본 연구에서는 삭마가 일어나는 조건에서 여러 재료의 연소관단열재의 열반응 특성을 동시에 평가하고 상대비교 할 수 있는 시험장치를 개발하였으며, 4 종의 각기 다른 재료를 동시에 장착하고 시험을 수행하여 시험장치의 안전성 확인 및 열반응 상수를 얻기 위한 기본 데이터를 획득하였다.

## 2. 시험 장치

시험장치는 연소관 부, 시편 부, 노즐 부로 구성되어 있으며, 시편 부는 유동안정화 부와 센서 부로 구성되어 있다. 연소관 부와 노즐 부의 단면은 원형이며, 시편 부의 단면은 사각형이다. 연소실 압력 2,500 psi, 연소시간 40 s까지 시험이 가능하도록 설계하였으며, 형상은 Fig. 1과 같다.

연소관 부는 추진제 충전체①, 연소관 구조체②, 앞마개③, 축소부내열재 1④, 축소부단열재⑤, 그리고 축소부내열재 2⑥로 구성되어 있다. 추진제 충전체는 카트리지 타입으로 되어 있으며, 원

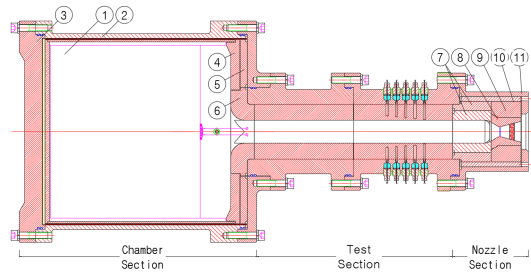


Fig. 1 Cross section of test equipment.

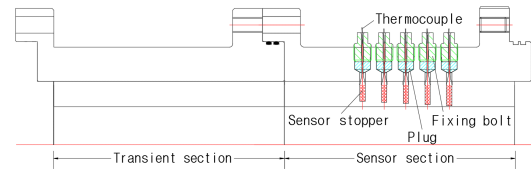


Fig. 2 Details of test section.

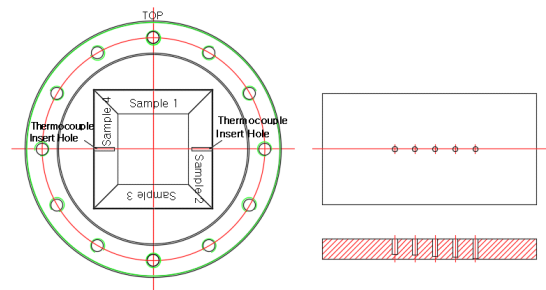


Fig. 3 Details of sensor section

하는 양의 추진제를 충전하고 나머지 부위는 비활성 물질(Inert)을 채워 연소시간을 조절한다. 추진제 형상은 연소시간 동안 시편에 일정한 Heat Flux를 공급하고, 장시간 연소가 가능하도록 End Burning Grain을 사용한다. 연소관 구조체 내부에는 연소가스로부터 구조물을 보호하기 위한 연소관단열재가 있다. 축소부내열재 2는 연소관 부와 시편 부를 연결해 주며, 추진제가 연소되면서 발생하는 가스의 유동을 2 차원 축대칭 유동에서 2 차원 평판 유동으로 바꾸어 준다. 연소관 후방에는 연소실 압력을 측정하기 위한 압력 홀(Hole)이 있으며, 점화기는 추진제 표면에 부착한다.

시편 부는 천이영역 부와 센서 부, 연결관 구조체로 되어 있다. 시편부의 상세형상은 Fig. 2와

같으며, 센서 부의 단면 형상은 Fig. 3과 같다. 천연영역 부는 연소가스가 센서 부에 도착하기 전 유동을 안정화시키는 역할을 하며, 센서 부와 동일한 소재를 사용한다. 센서 부는 재료의 열반응을 관찰하는 영역이며, 여러 종류의 시편을 동시에 장착하여 내열성능을 상대비교 할 수 있고, 마주보는 두 면에 열전대를 장착하여 연소시간 동안 시편 내부의 온도를 측정할 수 있다. 열전대를 고정하는 센서고정마개(Sensor Stopper)는 시편과 동일한 재료를 사용하며, 연소가스의 누출 방지 및 열전대 고정을 위해 플러그(Plug)와 고정볼트(Fixing Bolt)를 사용한다. 시편 중앙에 등 간격으로 다섯 개의 열전대를 설치할 수 있는 홀이 있으며, 센서 깊이, 즉 홀 바닥면에서 연소가스에 노출되는 면까지의 거리는 열환경을 고려하여 결정한다. 센서 깊이와 열전대 접점의 접촉 상태는 시험데이터의 유효성을 결정하는 매우 중요한 요소이기 때문에 시험전 X-ray 장비를 사용하여 측정하고 확인한다. 또한 시편 치수의 공차는 시험의 안전성에 매우 중요한 요소이므로  $\pm 0.1$  mm 가 되도록 하며, 시험 안전을 위해 부가적으로 시편과 시편이 만나는 모서리는 밀봉제로 도포한다. 시편 부의 연소가스속도는 추진제 표면적, 사각패널의 폭, 노즐목 직경으로 조절한다.

노즐 부는 2 조각의 연결부내열재⑦, 목삽입재⑧, 목내열재⑨, 목단열재⑩, 노즐 구조체⑪로 구성되어 있다. 연결부내열재는 시편 부와 노즐 부를 연결해주며, 시편 부의 2 차원 평판 유동을 다시 2 차원 축대칭 유동으로 바꾸어 준다. 목삽입재는 연소시간 동안 시편에 일정한 Heat Flux를 공급할 수 있도록 노즐목 삭마를 최소화할 수 있는 소재를 사용한다. 목내열재는 목삽입재에 전달된 열이 배면으로 원활하게 빠져 나가도록 하며, 목단열재는 목내열재로부터 전달된 열로부터 구조물을 보호하기 위하여 열을 차단한다.

### 3. 시험평가 및 결과

시편이 삭마가 일어나는 조건에서 시험장치의 안전성을 확인하기 위하여 시편 부에서의 연소가

스속도 100 m/s으로 시험을 수행하였다. 4 종의 서로 다른 시편을 장착하였으며, 시편 3(Sample 3)에는 5 개의 열전대를 깊이별로 장착하였다.

시험후 시험장치의 안전성 확인을 위하여 분해 과정에서 각 부품의 상태를 확인하였으며, 내열부품 간에 연소가스의 유입흔적 혹은 특이현상은 발견되지 않았다. 연소가스에 노출되는 시편의 표면은 삭마가 심하게 발생하였으며, 연소가스에 포함되어 있는 작은 알루미늄( $Al_2O_3$ ) 입자들이 확인되었다. 노즐목 부근에는 알루미늄 피막층이 형성되어 있으며, 내열부품의 상태는 양호하였다. Fig. 4는 연소중의 압력 변화를 보여준다. 압력 변화가 미진한 것으로 보아 노즐목의 직경 변화가 미진한 것으로 예상되며, 연소시간 동안 일정한 Heat Flux가 재료 표면에 가해졌다고 유추할 수 있다. 압력-시간 선도를 이용하여 유효연소시간( $\tau_{eff}$ ) 및 연소실 유효평균압력( $P_{c,eff}$ )을 산출하였다. 여기서 유효연소시간은 연소초기 압력이 100 psi에 도달하는 시간부터 연소말기 압력이 30 psi에 도달하는데 걸린 시간이며, 연소실 유효평균압력은 유효연소시간까지 압력을 적분하여 유효연소시간으로 나눈 값으로서, 두 변수는 재료에 가해진 열하중 지표로 활용된다. 계측데이터를 이용하여 구한 연소실 유효압력 및 유효 연소시간은 각각 10.7 s 및 878 psi이다. Fig. 5는 연소시간 동안 시편 3의 내부 온도 변화를 보여준다. 계측데이터에서 900 °C 이상인 데이터는 제거하였다. 여기서 T1 ~ T5는 센서 깊이, 즉 연소가스에 노출되는 시편의 표면에서 열전대 접점까지의 거리는 각각 1.0 mm, 2.0 mm, 2.9 mm, 3.9 mm, 5.0mm이다. 센서 깊이가 작을수록 온도 상승이 빠르게 반응하고 있으며, 시간차만 있을 뿐 유사한 곡선 형태를 보인다. 이는 연소중에 연소가스에 노출된 시편 표면이 균일하게 삭마되고 있기 때문으로 판단된다. 열반응 상수를 결정하기 위해 재료의 열분해 시작온도에 도달하는데 걸린 시간을 각 측정위치에서 구하였으며, T1 ~ T5이 각각 0.91 s, 2.27 s, 3.21 s, 4.17 s, 5.61 s이다. Fig. 6은 솟음을 제거한 후 연소가스에 노출되었던 표면의 상태를 보여준다. 연소가스의 유동은 상단에서 하단으로

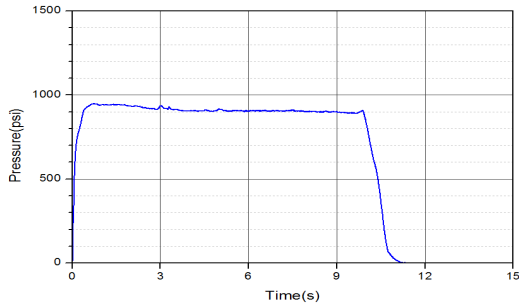


Fig. 4 Pressure-time curve.

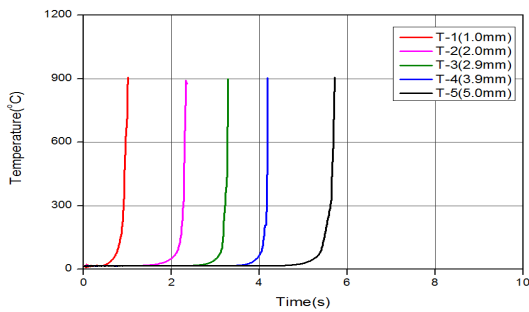


Fig. 5 Temperature-time curve.



Fig. 6 Surface shape of test samples after test.  
(Sample 4, 3, 2, 1 from left, respectively)

Table 1. TDD of test samples along the axial length.

Sample No.	Thickness (mm)	Position(mm)										Ave. (mm)
		20.0	40.0	60.0	80.0	100.0	120.0	140.0	160.0	180.0	200.0	
1	Test before	34.0	33.9	33.9	33.9	33.9	33.9	33.9	33.9	33.9	33.9	33.9
	Test after	27.2	26.2	26.0	26.1	26.4	26.6	26.7	26.5	26.7	26.9	26.5
	Thermal destruction	6.8	7.7	7.9	7.8	7.6	7.3	7.2	7.4	7.2	7.1	<b>7.4</b>
2	Test before	33.3	33.3	33.4	33.4	33.5	32.4	33.4	33.4	33.3	33.4	33.3
	Test after	24.5	25.2	25.8	26.5	26.9	26.4	26.0	26.3	26.5	26.9	26.1
	Thermal destruction	8.8	8.1	7.6	6.9	6.5	6.1	7.4	7.1	6.8	6.5	<b>7.2</b>
3	Test before	32.9	33.4	33.7	33.7	33.6	33.7	33.6	33.6	33.5	33.5	33.5
	Test after	29.1	28.2	27.6	27.1	27.1	26.9	26.8	27.2	26.8	28.7	27.5
	Thermal destruction	3.9	5.2	6.1	6.6	6.5	6.8	6.8	6.3	6.7	4.8	<b>6.0</b>
4	Test before	33.0	32.9	32.8	32.8	32.8	32.7	32.8	32.9	32.9	32.8	32.8
	Test after	28.1	28.3	28.0	28.0	28.2	28.9	28.9	29.0	29.0	29.0	28.5
	Thermal destruction	4.9	4.6	4.8	4.8	4.7	3.8	4.0	3.8	3.9	3.9	<b>4.3</b>

진행되었으며, 시편 번호는 우측에서부터 1, 2, 3, 4 순이다. 시험후 센서 부의 시편에서 숯을 제거한 후 열파괴두께를 Table 1에 정리하였다. 여기서 열파괴두께(Thermal Destruction Depth, TDD)는 삭마두께와 숯깊이를 합한 두께이다. 유동 방향을 따라 시편 시작지점에서부터 20 mm 등간격으로 잔류두께를 측정하였으며, 시작 지점과 끝 지점에서 측정한 값은 제거하였다. 측정한 잔류두께와 시험전 두께를 이용하여 열파괴두께를 계산하였다. 시편 4의 열파괴두께 평균값이 4.3 mm로 다른 소재에 비해 내삭마성이 가장 우수하였으며, 다음으로 시편 3, 2, 1 순이었다. 평균에 대한 표준편차의 비로 표현되는 변동계수(Coefficient of Variation)는 시편 1, 2, 3, 4가 각각 0.06, 0.17, 0.16, 0.12로 측정방향을 따라서 대체적으로 균일한 열파괴두께를 보였음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

고체로켓 추진기관용 연소관단열재의 열반응 특성을 평가하기 위한 모사시험장치를 개발하였다. 시험장치는 연소실 압력 2,500 psi, 연소시간 40 s까지 시험할 수 있으며, 삭마가 일어나는 조건을 모사할 수 있고, 여러 시편을 동시에 장착하여 상대비교 할 수 있다.

시험장치의 안전성을 확인하기 위하여 연소실 유효평균압력 878 psi, 유효연소시간 10.7 s, 연소가스 속도 100 m/s로 시험을 수행하여 시험장치의 안전성을 확인하였으며, 내열고무의 열적 성능을 평가하기 위한 기본 데이터인 압력-시간 선도 및 온도재료 내부의 깊이별 온도-시간 선도, 열파괴 두께를 획득하였다.